

辽西北票早侏罗世兴隆沟组英安岩的地球化学特征*

李伍平^{1,2}LI WuPing^{1,2}

1. 广州大学土木工程学院, 广州 510006

2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China

2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510640, China

2006-01-27 收稿, 2006-03-27 改回。

Li WP. 2006. Geochemical characteristics of the early Jurassic dacites of the Xinglonggou Formation in Beipiao area, west Liaoning province. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6):1608-1616

Abstract The early Jurassic dacites of the Xinglonggou Formation in Beipiao area of West Liaoning Province have similar geochemical characteristics of adakite, which is generated from partial melting of young oceanic crust. Dacites are high SiO_2 ($\geq 63.93\%$) high Al_2O_3 ($\geq 15.40\%$) high Na_2O ($\geq 3.65\%$) high MgO ($\geq 2.32\%$, $0.48 \sim 0.61$ in $\text{Mg}^\#$) lavas characterizes by high trace element contents ($\text{Cr} > 119\text{ppm}$, $\text{Ni} > 75\text{ppm}$, $\text{Sr} > 463\text{ppm}$) and low heavy rare earth element contents ($\text{Yb} < 1.70\text{ppm}$, $\text{Y} < 17\text{ppm}$), and high La/Yb (> 18) high Sr/Y (> 34) low Rb/Sr (≤ 0.31) ratios, and by strongly fractionated LREE and negligible negative Eu anomalies ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.80 \sim 0.87$). Their Nd-Sr-Pb isotopic compositions ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512414 \sim 0.512502$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -2.10 \sim -0.38$, $T_{\text{DM}} = 0.89 \sim 1.02\text{Ga}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7073 \sim 0.7075$, $\epsilon_{\text{Sr}}(t) = 11.16 \sim 13.78$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.28 \sim 18.40$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.42 \sim 15.53$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.08 \sim 38.27$) differ from the Archeozoic lithosphere mantle and the middle Jurassic, later Jurassic and the early Cretaceous volcanic rocks of the North China Craton. The Author thinks that the magmas were generated from partial melting of subducted oceanic slab of the Paleo-Asian Ocean and interacted with the Archeozoic lithosphere mantle during the ascending magmas, implying that the subduction of the Paleo-Asian Ocean beneath the North China Craton in Paleozoic might took placed.

Key words Dacite, the Paleo-Asian Ocean, The early Jurassic, West Liaoning Province, Yanshan Orogen

摘要 辽西北票早侏罗世兴隆沟组英安岩具有埃达克岩的地球化学特征。它们具有较高的 SiO_2 ($\geq 63.93\%$)、 Al_2O_3 ($\geq 15.40\%$)、 Na_2O ($\geq 3.65\%$) 和 MgO ($\geq 2.32\%$, $\text{Mg}^\# = 0.48 \sim 0.61$) 含量, 较高的 Sr ($> 463\mu\text{g/g}$)、 Cr ($> 119\mu\text{g/g}$)、 Ni ($> 75\mu\text{g/g}$) 含量, 较低的 Yb ($< 1.70\mu\text{g/g}$)、 Y ($< 17\mu\text{g/g}$) 含量, 高的 La/Yb (> 18)、 Sr/Y (> 34) 值和低 Rb/Sr (≤ 0.31) 比值, 稀土元素强烈分馏, 弱的负铕异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.80 \sim 0.87$)。它们的 Nd 同位素 ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512414 \sim 0.512502$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -2.10 \sim -0.38$, $T_{\text{DM}} = 0.89 \sim 1.02\text{Ga}$), Sr 同位素 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7073 \sim 0.7075$, $\epsilon_{\text{Sr}}(t) = 11.16 \sim 13.78$) 和 Pb 同位素 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.28 \sim 18.40$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.42 \sim 15.53$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.08 \sim 38.27$) 组成与华北陆块古老的岩石圈地幔及其中部的中晚侏罗世和早白垩世火山岩不同。这表明兴隆沟组英安岩可能是古亚洲洋壳残片部分熔融形成的, 熔体在上升过程中与地幔楔发生过强烈的混染作用。据此, 推测古亚洲洋曾向华北陆块发生过俯冲作用。

关键词 英安岩; 古亚洲洋; 早侏罗世; 辽西; 燕山造山带

中图法分类号 P588.143; P534.52

兴蒙造山带和华北陆块具有不同的地壳演化史。前者处于西伯利亚陆块和中朝~塔里木陆块之间的中亚造山带

东端,是在古亚洲洋基础上发展起来的,到石炭纪末古亚洲洋完全封闭(Dobretsov *et al.*, 1995),最终与华北陆块和西伯

* 国家自然科学基金项目重点项目(批号 40334039 和批号 40132020)联合资助

第一作者简介: 李伍平,男,1963年生,博士,研究员,岩石学专业, E-mail: wpli841@suho.com

利亚陆块碰撞拼接形成了统一的欧亚大陆。后者位于中朝~塔里木陆块东部, 古生代长期处于稳定状态。晚古生代末期, 华北陆块南缘受扬子陆块俯冲作用的影响 (Yin *et al.*, 1996; 董树文等, 2000), 造成华北陆块内部活化, 出现了少量岩浆活动 (张招崇和王永强, 1997)。但是, 古亚洲洋与中朝陆块碰撞拼接过程中是否发生过俯冲作用, 目前缺乏这方面的证据。

兴蒙造山带与华北陆块北缘 (即燕山造山带) 古生代-中生代火成岩的源区受不同构造块体制约。兴蒙造山带火成岩来源于较年轻的地壳或相对亏损地幔源区, 其 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 较高 (陈义贤等, 1997; 韩宝福等, 1999; 洪大卫等, 2000; 阎国翰等, 2000; Jahn *et al.*, 2001; Wu *et al.*, 2002); 而华北陆块内部火成岩源于古老地壳或富集地幔源区, 其 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 较低 (张理刚等, 1995; 陈义贤等, 1997; 许保良等, 1998; 李伍平等, 2000, 2001, 2002, 2004; 张旗等, 2001)。因此, 对燕山造山带北缘中生代火山岩的元素-同位素地球化学及其岩浆起源研究, 可以为研究区域地壳演化与岩石圈结构提供重要信息。

1 火山岩地质与岩相学

辽西北票处于华北陆块北缘 (燕山造山带北部) 岩石圈断裂 (康宝~赤峰~开原断裂) 南侧, 兴隆沟组火山岩分布于辽西朝阳龙王庙子~朱杖子、北票兴隆沟至三宝之间, 角度

不整合于震旦系和三迭系地层之上 (图 1), 被北票组 (J_1b) 地层平行不整合覆盖。地层厚度为 181~637 米。这套地层底部为黄褐色、紫红色砂砾岩, 灰绿色凝灰角砾岩、砂岩和粉砂岩, 下部为灰紫色安山质集块岩夹砂砾岩, 中部为灰色、灰黑色英安岩, 上部为灰色、灰黑色气孔杏仁状英安岩夹安山岩。

关于兴隆沟组火山岩的形成时代还存在明显分歧。过去一直认为兴隆沟组形成于早侏罗世, 其地质依据: 兴隆沟组被早侏罗世北票组 (J_1b) 煤系地层平行不整合覆盖 (辽宁省区域地质志, 1989) 或被海房沟组 (J_2h) 角度不整合覆盖, 且北票组和海房沟组含有典型的植物和孢粉化石, 火山岩的全岩 Ar-Ar 等时线年龄 ($194.7 \pm 1.9 \text{ Ma}$, $188.2 \pm 7.4 \text{ Ma}$; 陈义贤和陈文寄, 1997)、全岩坪年龄 (189.6 Ma; 陈义贤和陈文寄, 1997)、全岩 K-Ar 年龄 ($191.0 \pm 6.0 \text{ Ma}$) 和全岩 Rb-Sr 等时线年龄 ($198.5 \pm 2.5 \text{ Ma}$, $199.4 \pm 9.8 \text{ Ma}$; 王东方等, 1983) 等也支持这一观点。另一种观点认为兴隆沟组火山岩形成于晚侏罗世, 主要根据火山岩锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 ($159 \pm 3 \text{ Ma}$) (Gao *et al.*, 2004)。根据以上资料综合分析, 本文暂采纳第一种观点。

辽西早侏罗世兴隆沟组火山岩主要为英安岩, 含少量安山岩。英安岩呈灰色、灰黑色, 斑状结构, 气孔、杏仁状构造。根据显微镜下观察与电子探针分析, 英安岩中的斑晶 (20~25%) 以中~更长石 (An_{13-45}) 和斜方辉石为主, 偶见钾长石

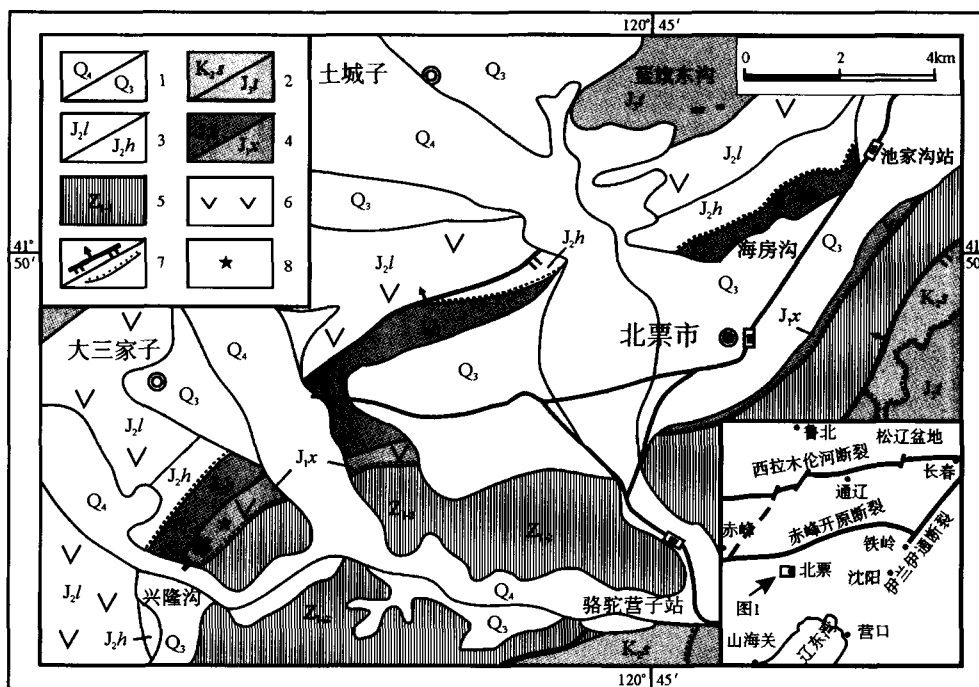


图 1 辽西北票地区地质简图 (据 1:20 万区域地质图改编)

1-第四系/第三系; 2-上白垩统孙家湾组/上侏罗统土城子组; 3-中侏罗统蓝旗组/海房沟组; 4-下侏罗统北票组/兴隆沟组; 5-震旦系; 6-火山岩; 7-断层/角度不整合; 8-采样位置

Fig. 1 Geological sketch map in Beipiao area, West Liaoning Province

表1 英安岩主要造岩矿物电子探针分析

Table 1 The analyzed data of main minerals (%) by electronic probe

样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	MgO	CaO	NiO	Cr ₂ O ₃	Total	矿物
P-2(1)	55.53	0.11	1.86	9.88	0.04	0.00	0.19	31.24	0.90	0.11	0.60	100.47	Opx(斑晶)
P-2(2)	55.31	0.02	27.27	0.80	5.38	0.40	0.03	0.04	10.92	0.01	0.03	100.19	Pl(斑晶)
P-2(3)	52.37	0.42	1.89	7.74	0.31	0.02	0.23	16.44	20.83	0.05	0.06	100.37	Cpx(基质)
P-2(4)	52.29	0.34	1.33	6.94	0.30	0.01	0.18	17.03	20.91	0.02	0.07	99.42	Cpx(基质)
P-7(1)	55.82	0.10	0.67	10.69	0.02	0.00	0.23	31.12	1.38	0.11	0.25	100.39	Opx(斑晶)
P-7(2)	51.86	0.47	2.22	6.47	0.29	0.00	0.12	16.73	21.09	0.06	0.10	99.40	Cpx(基质)
P-7(4)	52.78	0.32	1.51	6.41	0.28	0.00	0.18	17.98	20.25	0.07	0.39	100.15	Cpx(基质)
P-9(1)	54.24	0.09	2.04	10.58	0.05	0.01	0.20	30.35	1.03	0.12	0.67	99.37	Opx(斑晶)
P-9(2)	51.35	0.50	2.73	7.29	0.30	0.05	0.21	16.35	20.97	0.00	0.02	99.75	Cpx(基质)

注: 矿物电子探针分析采用日本电子 JXA-8800R 型仪器分析, 由中山大学中心实验室赵文霞博士分析。

斑晶; 基质(75~80%)由细长条状更长石(An₁₂)、细粒单斜辉石、玻璃和铁质组成(表1)。斑晶或基质中未见到石英。其中, 斜方辉石斑晶(10~15%)为自形~半自形状, 有时聚集分布, 沿边部、解理或裂隙发生滑石化、绿帘石化和绿泥石化, 且 MgO 含量边部高于核部, 且 Cr、Ni 含量较高, 显示出斑晶与地幔岩浆发生过相互作用; 中~更长石斑晶(15~10%)为自形~半自形板状, 聚片双晶, 有时定向排列; 钾长石斑晶(<3%)半自形板状, 具卡氏双晶。基质为玻晶交织结构, 单斜辉石颗粒细小, Mg、Cr、Ni 含量较低, 与斑晶斜方辉石截然不同, 为岩浆冷凝结晶而成。岩石受到后期构造影响, 局部发生破裂并碳酸盐化。

2 样品采集与分析

样品采集于辽西北票兴隆沟村四坑煤矿以南兴隆沟组剖面。样品沿火山岩露头剖面连续采集, 样品均为英安岩。除 SiO₂ 和灼失量采用重量法分析外, 其余元素采用酸溶法溶解。主量元素和微量元素分别采用 Varian Vista-PRO 型 ICP-AES 和 PE Elan 6000 型 ICP-MS 方法测定(见李献华等, 2002)。Nd、Sr 同位素和 Pb 同位素比值在中国科学院广州地球化学研究所分别在英国产“ISOPROB”型多接收器等离子体质谱仪上分析(MC-ICPMS)(见韦刚健等, 2002; 梁细荣等, 2003)和 VG354 同位素质谱仪上分析完成。整个实验流程本底 Sr 为 2~5 × 10⁻¹⁰ g, Nd 小于 5 × 10⁻¹¹ g, Pb 为 5 × 10⁻¹⁰ g。Rb、Sr、Sm 和 Nd 含量通过 ICP-MS 分析测得。实验分析结果见表 2、3。

3 地球化学特征

9 件样品中有三件样品(BP-1-1, -7, -4-1)可能受蚀变影响, 其烧失量较高(2.23~3.30%), 并造成 K₂O 和 Na₂O 含量降低, 其它样品中 K₂O 含量均较高(3.35~3.80%)。为防止蚀变对岩石 K、Na 含量的影响, 本文采用高场强元素对岩石进行分类与命名。

在 SiO₂~Zr/Ti 图解中(略), 所有样品落入亚碱性系列,

岩石类型为英安岩。在 FAM 及 SiO₂~K₂O 图解中(略)落入高钾钙碱性~钙碱性系列区。样品 SiO₂(≥63.93%)、Al₂O₃(≥15.40%)、Na₂O(≥3.65%)、MgO(2.32~3.82%, Mg* ≥ 0.48)和 CaO(3.36~6.04%)含量较高, TiO₂(<0.65%)和 P₂O₅(≤0.20%)含量较低, Na₂O/K₂O 值大于 1。其中, MgO 含量明显高于岛弧英安岩、太古代 TTG、adakite 和燕山造山带中生代高 Sr 低 Y 型中酸性岩(图 2), 这可能与岩石中含有较高的斜方辉石斑晶有关。

兴隆沟组英安岩的稀土元素配分曲线为轻稀土富集型((La/Yb)_N > 19), 重稀土元素亏损((Ho/Yb)_N ≥ 1.20, Yb < 1.70 μg/g, Y < 17 μg/g), 弱负铈异常(Eu/Eu* = 0.80~0.87)(图 3A)。高 Sr(>463 μg/g)含量和高 Sr/Y(>34)、Y/Yb(>1.15)值(图 4), 这些都是岛弧 adakite 和太古代 TTG 的典型特征。

英安岩中 Cr(119.9~133.1 μg/g)、Ni(75.71~87.59 μg/g)含量较高, 明显高于燕辽地区中晚侏罗世中

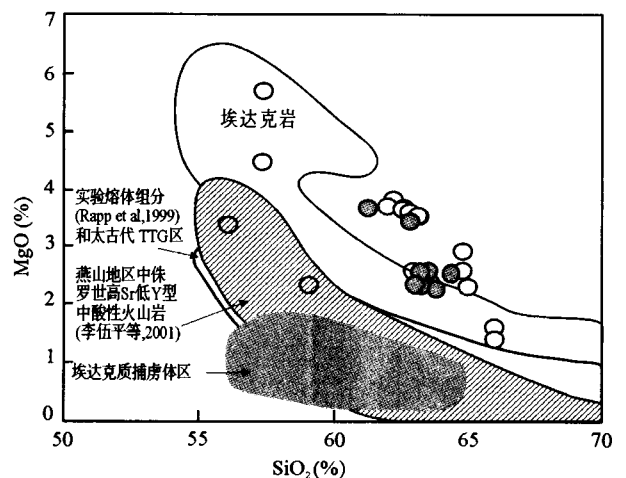


图2 兴隆沟组英安岩 MgO 与 SiO₂ 关系图解(据 Defant & Kepezhinskas, 2001)

实心圆为本文资料, 空心圆源于 Gao et al., (2004)

Fig. 2 MgO vs SiO₂ diagram (After Defant & Kepezhinskas, 2001)

表2 兴隆沟组火山岩主量元素(%) 和微量元素($\mu\text{g/g}$) 分析结果

Table 2 The analyzed data of major elements (%) by ICP-AES and trace elements (ppm) by ICP-MS

样号	BP-1	BP-2	BP-3	BP-4	BP-5	BP-6	BP-7	BP-1-1	BP-4-1
SiO ₂ %	63.15	63.30	64.45	63.21	63.68	63.62	61.26	62.88	63.87
TiO ₂	0.63	0.63	0.62	0.62	0.62	0.61	0.61	0.58	0.57
Al ₂ O ₃	15.31	15.24	15.31	15.18	15.39	15.10	14.82	14.96	14.93
Fe ₂ O ₃ T	4.93	4.83	4.74	4.76	4.78	4.55	4.65	4.57	4.59
MnO	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.08	0.07	0.04
MgO	2.34	2.57	2.52	2.31	2.39	2.55	3.66	3.44	2.24
CaO	3.63	3.83	3.74	3.72	3.53	3.63	5.78	5.27	3.26
Na ₂ O	4.02	4.00	4.02	3.94	3.93	3.92	3.50	3.78	3.78
K ₂ O	3.80	3.66	3.75	3.79	3.79	3.65	1.27	1.26	3.35
P ₂ O ₅	0.20	0.20	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.18	0.18
LOI	1.99	1.64	1.46	1.84	1.68	1.64	3.30	2.86	2.23
Total	100.06	99.95	100.86	99.62	100.02	99.51	99.12	99.84	99.05
Mg [#]	0.48	0.51	0.51	0.49	0.50	0.53	0.61	0.60	0.49
La $\mu\text{g/g}$	34.87	30.00	29.18	31.40	36.24	29.93	27.11	23.93	27.39
Ce	66.30	59.96	56.45	60.38	69.23	57.31	53.22	46.57	45.11
Pr	8.25	6.85	6.60	7.19	8.49	6.84	6.08	5.51	6.28
Nd	30.62	25.27	24.34	26.75	33.46	24.93	22.32	19.80	23.59
Sm	5.25	4.30	4.15	4.57	5.50	4.26	3.81	3.47	4.07
Eu	1.28	1.06	1.02	1.13	1.42	1.05	0.92	0.88	1.04
Gd	3.76	3.24	3.19	3.56	4.11	3.30	2.97	2.69	3.12
Tb	0.54	0.45	0.44	0.49	0.55	0.46	0.42	0.38	0.44
Dy	2.63	2.32	2.21	2.46	2.69	2.33	2.13	1.94	2.21
Ho	0.49	0.44	0.42	0.46	0.48	0.44	0.39	0.36	0.41
Er	1.26	1.15	1.14	1.21	1.24	1.19	1.05	0.96	1.07
Tm	0.18	0.16	0.16	0.17	0.17	0.16	0.15	0.14	0.15
Yb	1.17	1.03	1.01	1.09	1.08	1.03	0.97	0.89	0.95
Lu	0.16	0.15	0.16	0.17	0.16	0.16	0.15	0.14	0.14
Cr	123.7	119.9	125.7	123.0	121.1	122.3	133.1	128.1	126.5
Co	11.72	13.48	13.36	12.08	12.35	13.74	15.37	13.05	10.89
Ni	84.82	80.33	85.88	86.31	85.12	84.45	87.59	75.71	77.60
U	3.11	3.00	3.16	3.00	2.99	3.11	3.29	2.90	2.57
Th	12.12	11.91	11.85	11.93	11.69	11.97	11.77	10.43	10.94
Pb	18.39	17.01	17.32	17.94	17.68	17.91	17.83	17.12	16.93
V	70.16	69.95	68.63	71.29	66.91	69.43	77.13	72.19	63.32
Rb	132.2	125.1	137.0	141.7	144.6	136.4	25.2	30.4	116.6
Sr	474.8	491.4	497.4	487.2	464.0	495.3	857.0	685.1	463.5
Ba	746.7	739.7	755.9	746.9	766.6	769.8	748.2	696.0	690.1
Cs	4.15	4.54	5.69	6.27	6.77	5.76	34.49	25.73	3.28
Ta	0.50	0.47	0.47	0.48	0.47	0.49	0.47	0.42	0.45
Nb	6.59	6.53	6.61	6.67	6.42	6.62	6.78	5.13	5.18
Hf	4.15	4.07	4.15	4.12	4.09	4.16	4.20	3.94	4.17
Zr	173.6	171.0	172.4	174.5	168.2	174.2	175.9	162.6	161.7
Ga	19.23	18.95	19.47	19.36	18.45	19.23	18.98	16.33	16.87
Sc	11.71	10.13	9.47	10.31	10.63	10.56	9.35	8.52	9.27
Y	13.67	12.62	12.34	13.40	13.75	12.88	12.11	11.19	12.14
(La/Yb) _N	21.34	20.95	20.72	20.64	24.02	20.78	20.13	19.24	20.62
Sr/Y	34.73	38.94	40.31	36.36	33.75	38.45	70.77	61.24	38.18
Y/Yb	11.66	12.29	12.22	12.28	12.71	12.47	12.54	12.54	12.74
Σ REE	156.74	136.38	130.46	141.01	164.81	133.38	121.67	107.66	115.99
Eu/Eu [*]	0.83	0.83	0.83	0.82	0.87	0.82	0.80	0.85	0.86

注: 1. 主量与微量元素在中国科学院广州地球化学研究所分别采用 ICP-AES 和 ICP-MS 分析; 2. Mg[#] = Mg/(Mg + Fe);

3. 球粒陨石标准化值引自 Sun and McDonough (1989)

表3 兴隆沟组火山岩 Nd,Sr,Pb 同位素分析结果

Table 3 Isotopic date of Nd,Sr and Pb for volcanic rocks of the Xinglonggou Formation

样号	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd ± 2σ	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr ± 2σ	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	T _{DM} (Ga)	ε _{Nd} (t)	ε _{Sr} (t)
BP-1	0.1037	0.512480 ± 10	0.8058	0.707383 ± 16	18.40	15.53	38.25	0.93	-0.82	13.28
BP-2	0.1030	0.512502 ± 10	0.7368	0.707232 ± 11	18.37	15.53	38.22	0.89	-0.38	13.78
BP-4	0.1034	0.512414 ± 10	0.8417	0.707331 ± 13	18.28	15.42	38.08	1.02	-2.10	11.16
BP-6	0.1033	0.512477 ± 10	0.7970	0.707237 ± 14	18.39	15.53	38.27	0.93	-0.88	11.54

注: 1. t = 190Ma; 2. Nd,Sr 同位素样品在中国科学院广州地球化学研究所英国产“ISOPROB”型多接收器等离子体质谱仪(MC-ICPMS)上完成; 3. Pb 同位素样品在中国科学院广州地球化学研究所 VG354 同位素质谱谱仪上完成,分析误差小于 0.1 %

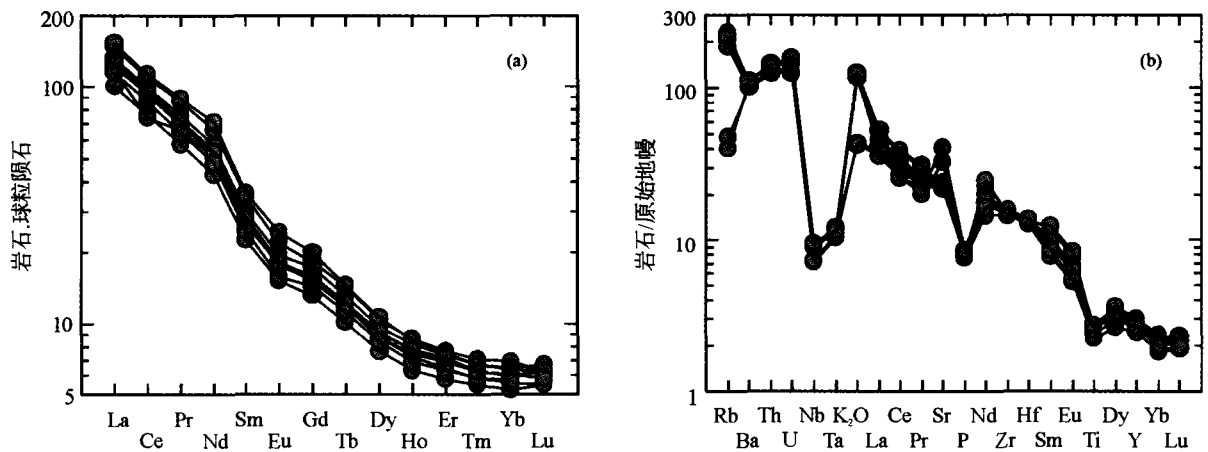


图3 兴隆沟组英安岩稀土元素配分曲线模式(A)与微量元素蛛网图(B) (标准化值引自 Sun & McDonough[1989])

Fig. 3 Chondrite-normalized REE distribution patterns (A) and Primary mantle-normalized incompatible element patterns (B)

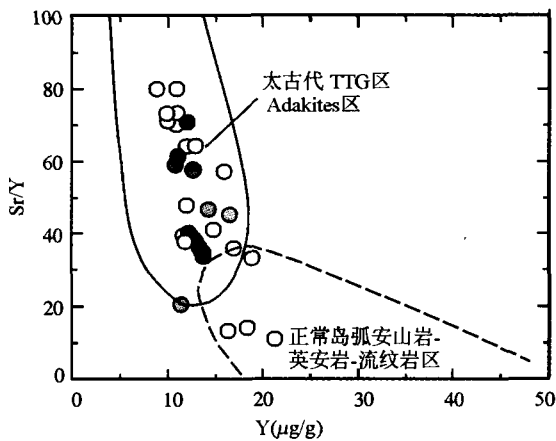


图4 Sr/Y -Y 关系图解(据 Defant & Drummond[1990]) 灰心圆资料源于陈义贤等(1997),空心圆资料源于 Gao et al. (2004),实心圆为本文资料

Fig. 4 Sr/Y vs Y diagram (After Defant & Drummond [1990])

酸性火山岩(李伍平等,2000,2001,2004)。在微量元素蛛网图上(图3B),大离子亲石元素,如 Ba,Th-U,Sr,Pb 和轻稀土元素富集,高场强元素 Nb,Ta,Ti 相对亏损,特别是 Nb-Ta,Ti 与 P 的显著亏损和 Pb 的富集,表明有沉积物的加入。

4 件样品的¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值为 0.512414 ~ 0.512502, ε_{ND}(t) 为 -2.10 ~ -0.38,亏损地幔模式年龄(T_{DM})为 0.89 ~ 1.02Ga; 4 件样品⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值为 0.7072 ~ 0.7074,ε_{Sr}(t) 为 11.16 ~ 13.78; 4 件样品²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 和²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 值分别为 18.28 ~ 18.40、15.42 ~ 15.53 和 38.08 ~ 38.27,显示略亏损至略富集的特征,与原始地幔 PM 端员接近(图5),说明岩浆源区可能为地幔分异产物或亏损组分与华北陆块岩石圈组分混合产物从地幔分离后的时间较短。这些同位素特征与兴蒙造山带古生代-中生代火成岩的同位素组成相似(张理刚等,1995; Zhu,1995; 陈义贤等,1997; 洪大卫等,2000; Jahn et al.,2001; 周新华等,2001; Wu et al.,2002),而与燕山造山带结晶基底或中晚侏罗世和早白垩世火山岩、中生代花岗岩明显不同(张理刚等,1995; 陈义贤等,1997; 李伍平等,2001,2002,2004)(图6)。兴蒙造山带古生代-中生代火成岩的源区为略亏损至略富集,一般²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 大于 18,²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 大于 38,ε_{ND}(t) 接近于 0,T_{DM} < 1.0Ga; 燕山造山带结晶基底或中晚侏罗世和早白垩世火山岩、中生代花岗岩的源区较富集,属于古老地壳或富集岩石圈地幔,一般²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb < 18,²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb < 38,ε_{ND}(t) < -10,亏损地幔模式年龄(T_{DM}) > 1.0Ga。即使与同时代的北京西山早侏罗世南大岭组玄武岩的 Nd,Sr 同位素(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.511845 ~ 0.512152,ε_{ND}(t) = -7.4 ~ -13.3,T_{DM} =

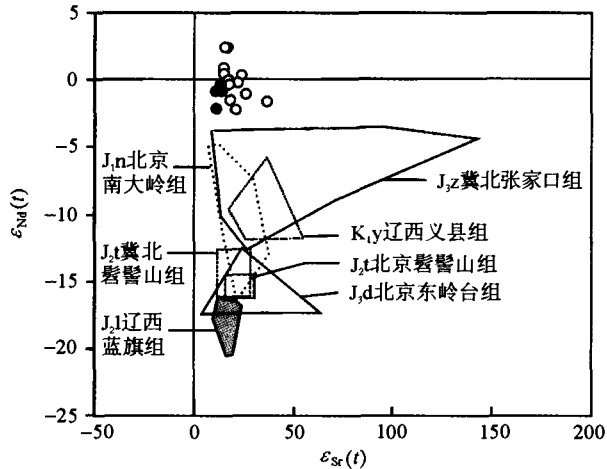


图5 兴隆沟组英安岩 $\epsilon_{ND}(t)$ - $\epsilon_{Sr}(t)$ 关系图解

图中符号同图2,南大岭组资料见李晓勇等(2004)和本文资料,髫髻山组和义县组资料见李伍平等(2001,2002,2004),其他资料均为作者未发表的资料

Fig.5 $\epsilon_{ND}(t)$ vs $\epsilon_{Sr}(t)$ diagram for dacites of the Xinglonggou Formation

1.46 ~ 1.98Ga, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7058 \sim 0.7067$, $\epsilon_{Sr}(t) = 21.9 \sim 25.4$, 李晓勇等,2004) 和 Pb 同位素特征 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.58$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.27$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 36.70$, 本文) 也有明显差异。

4 岩石成因

综上所述,兴隆沟组英安岩相对富集铝钠,较高的 MgO、Cr、Ni、Sr 含量和 Sr/Y 比值,较低的重稀土元素,其特征与俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩 (Defant & Drummond, 1990; Peacock *et al.*, 1994; Yogodzinski *et al.*, 1995; Martin, 1999; Rapp *et al.*, 1999; Castillo *et al.*, 1999; Shinjo, 1999; Defant & Kepezhinskas, 2001; Yogodzinski *et al.*, 2001; Polat & Kerrich, 2001; Kilian & Stern, 2002; Bourdon *et al.*, 2002) 或底侵玄武质岩石熔融形成的富钠中酸性火成岩 (Atherton & Petford, 1993; Petford & Atherton, 1996) 地球化学特征相似,不同于正常岛弧中酸性火山岩。同位素揭示出源区具有略亏损至略富集的特征。基于以上特征,本文对北票兴隆沟组英安岩的起源作以下讨论。

兴隆沟组英安岩可能有四种起源:(1)俯冲洋壳的熔融,并于上覆的地幔边界发生相互作用 (Kay, 1978; Defant & Drummond, 1990); (2)含水条件下地幔橄榄岩的部分熔融 (Stern & Hanson, 1991); (3)加厚大陆地壳玄武质岩石的熔融 (Atherton & Petford, 1993; Muir *et al.*, 1995; Petford & Atherton, 1996; Kay & Mpodozis, 2001; Kay & Kay, 2002); (4)拆沉下地壳的熔融 (Kay & Kay, 1993; Xu *et al.*, 2002; Gao *et al.*, 2004)。

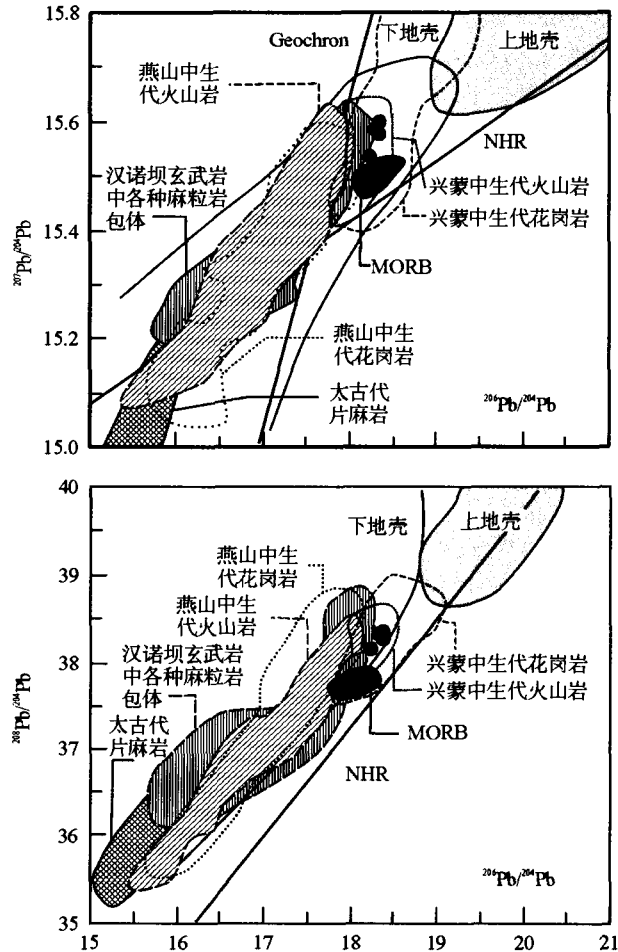


图6 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 关系图解

汉诺坝各种麻粒岩包体资料见张国辉等(1998)、陈道公等(1997)、Chen *et al.* (1995); 太古代片麻岩见罗毅等(1995)①; 燕山造山带和兴蒙造山带中生代火成岩见张理刚等(1995)陈义贤等(1997)、罗毅等(1995)、李伍平等(2001); 兴隆沟组资料见本文(实圆心)和陈义贤等(1997)(空心圆)

Fig.6 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagrams

从矿物组成(单斜辉石斑晶),高 Mg、Cr 和 Ni 含量,似乎兴隆沟组英安岩有幔源岩浆形成的可能性,或者英安质岩浆与地幔橄榄岩发生过相互作用。从岩石组合和岩石化学,高的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 、Sr/Y 和 La/Yb 值、高 Sr 低 Y、重稀土元素亏损、Eu 弱负异常、Nb-Ta、Ti 与 P 的显著亏损,由幔源玄武质岩浆结晶分异形成的可能性不大 (Castillo *et al.*, 1999)。在同位素组成上,由富集岩石圈地幔熔融形成英安岩的可能性也不大,且实验岩石学证实二辉橄榄岩也不可能直接熔出英安质岩浆 (Hirose, 1997)。因此,排除了兴隆沟组

① 罗毅,周德安,黄净白等. 1995. 燕辽地区火山热液型铀-金-多金属矿床特征及分布规律. 核工业部北京地质研究院(科研报告). 1995

英安岩由富集岩石圈地幔部分熔融或幔源岩浆的结晶分异作用形成的可能性。

对于第一、三、四种情况,亏损的重稀土元素和 Y 需要由基性源岩在较高压力(如石榴石稳定区域,即榴辉岩相)条件下形成。其中,第三种情况,在加厚地壳条件下,下地壳玄武质岩石部分熔融可以形成与埃达克岩地球化学相似的中酸性岩浆(Kay & Kay, 2001; Defant *et al.*, 2002; 李伍平等, 2001, 2004),但因岩浆不能与地幔发生相互作用,难于形成含有斜方辉石和较高 MgO、Cr 和 Ni 含量的中酸性岩浆(Shinjo, 1999; Polat & Kerrich, 2001),因而排出了兴隆沟组英安岩由加厚大陆地壳玄武质岩石的熔融形成的可能性。第四种情况,同样在地壳加厚的条件下,如华北陆块太古代榴辉岩发生拆沉,经部分熔融再与地幔发生相互作用,可以解释兴隆沟英安岩高 Mg、Cr、Ni 含量与含斜方辉石斑晶及继承锆石特征(Gao *et al.*, 2004),但是,华北陆块内部无论是太古代的榴辉岩还是加厚大陆下地壳都保留着华北陆块太古代岩石圈地幔的特征,其部分熔融产生的岩浆应继承富集地幔同位素组成的特点,这显然与兴隆沟组英安岩同位素组成(尤其是 Pb 同位素)不吻合。因此,本文也排除了第三、四情况的可能性。

对于第一种情况,中生代古太平洋板块和蒙古-鄂霍茨克洋的俯冲对东亚大范围火山和花岗岩浆作用所起的作用存在争议。但是,古太平洋板块向东亚俯冲始于中侏罗世,因而早侏罗世兴隆沟组英安岩的形成应与古太平洋洋壳俯冲无直接关系。即使兴隆沟组形成于晚侏罗世,但因北票距古太平洋板块俯冲带超过 1000 公里,古太平洋板块洋壳熔融也难以形成兴隆沟组英安岩。然而,古生代古亚洲洋曾发生过扩张与消减,有资料显示古生代古亚洲洋曾向华北陆块北缘发生过俯冲作用(Dobretsov *et al.*, 1995; 刘勇胜等, 1999)。只要在适当的构造背景条件下,具备一定的温压条件,这种俯冲于华北陆块北缘深部的古亚洲洋壳残片可能发生活化,经部分熔融形成兴隆沟组英安岩的可能性是存在的。

兴蒙造山带是在古亚洲洋基础上发展起来的,地壳组成比较年轻($T_{DM} < 1.0\text{Ga}$), Pb、Nd 同位素组成比较高(张理刚等, 1995; 陈义贤等, 1997; 洪大卫等, 2000; 阎国翰等, 2000; Jahn *et al.*, 2001; Wu *et al.*, 2002), 且 Pb 同位素具有明显的块体效应(Zhu, 1995; 朱炳泉和常向阳, 2001), 这些特征有别于华北陆块富集地幔源区同位素组成,但与兴隆沟组英安岩同位素组成接近(图 5)。另外,从兴蒙造山带→华北陆块,中生代火山岩和花岗岩的 Pb、Nd 同位素组成有降低趋势(陈义贤等, 1997; 周新华等, 2001), 表明其源区中加入古老地壳成分逐渐增多,或者古亚洲洋对华北陆块北缘岩石圈有明显的改造作用(李晓勇等, 2004)。

因此,本文认为兴隆沟组英安岩浆作用与古亚洲洋俯冲有关。即古生代古亚洲洋在消失前曾向华北陆块北缘发生过俯冲。到早侏罗世,燕山造山带北缘可能受到蒙古-鄂霍茨克洋的俯冲作用影响,使残留在华北陆块北缘深部的洋壳残

片发生部分熔融,这些熔体在上升过程中与华北陆块北缘上覆的岩石圈地幔楔发生相互作用,形成兴隆沟组英安岩浆。

如果这样的话,这意味着华北陆块北缘岩石圈有可能存在着双层结构,上部为华北陆块岩石圈(古老的富集地幔物质),下部残留古亚洲洋壳残片(相对年轻的或相对亏损地幔物质)。这为研究华北陆块北缘构造演化和深部岩石圈结构提供了重要信息。

5 结论

(1) 辽西北票早侏罗世兴隆沟组英安岩源区可能来自于古亚洲洋的洋壳残片,而非华北陆块古老富集地幔物质,与燕山造山带内部其它中生代钙碱性火山岩的来源不同。

(2) 早侏罗世,华北陆块北缘可能受到蒙古-鄂霍茨克洋俯冲的影响,残留在华北陆块北缘深部的古亚洲洋壳残片发生了部分熔融,这些熔体在上升过程中与上覆的岩石圈地幔发生相互作用,形成兴隆沟组英安岩浆。

致谢 感谢评审员提出的宝贵意见。成文过程中与李献华研究员、赵越研究员、路凤香教授和许继锋研究员进行了多次有益的讨论。样品分析过程中得到了梁细荣研究员、刘颖副研究员、涂湘林副研究员、胡光黔工程师、曾文工程师和赵文霞副教授等帮助,在此一并致谢。

References

- Atherton MP, Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362: 144 - 146
- Bourdon E, Eissen JP, Monzier M, Robin C, Martin H, Cotton J, Hall ML. 2002. Adakite-like lavas from Antisana volcano (Ecuador): evidence for slab melt metasomatism beneath Andean northern volcanic zone. *Journal of Petrology*, 43: 199 - 217
- Castillo PR, Janney PE, Solidum RU. 1999. Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134 (1): 33 - 51
- Chen DG, Zhi XC, Li B. 1995. Chemical and isotopic characteristics of gabbroic xenoliths from Hannuoba, China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 14(3): 276 - 287
- Chen DQ, Zhi XC, Li BX, Wang YX, Yang JD. 1997. Nd, Sr and Pb isotopic compositions and their petrogenetic information of pyroxenite xenoliths from Hannuoba basalts, China. *Geochimica*, 26 (1): 1 - 11
- Chen YX, Chen WJ. 1997. Mesozoic volcanic rocks in western Liaoning Province and surrounding area-geochronology, geochemistry and tectonic environment. Beijing: Seis. Publ. House, 1 - 279 (in Chinese with English abstract)
- Defant MJ, Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347 (18): 662 - 665
- Defant MJ, Kepezhinskias P. 2001. Evidence suggests slab melting in arc magmas. *EOS*, 82(6): 65 - 69
- Defant MJ, Xu JF, Kepezhinskias P, Wang Q, Zhang Q, Xiao L. 2002. Adakites: some variations on a theme. *Acta Petrologica Sinica*, 18: 129 - 142
- Dobretsov NL, Berzin NA, Buslov MM. 1995. Opening and tectonic

- evolution of the Paleo-Asian Ocean. *International Geo. Rev.*, 37; 335-360
- Dong SW, Wu XH, Wu HZ, Deng JF, Gao R, Wang CS. 2000. On tectonic seesawing of the eastasia continent-global implication of the Yanshanian Mountain. *Geological Review*, 46; 7-13
- Gao SH, Rudnick RL, Yuan HL. 2004. Recycling lower continental crust in the North China Craton. *Nature*, 432(16); 92-897
- Han BF, He GQ, Wang SG. 1999. Mantle-derived postcollisional magmatism, underplating and implications for basement of the Junggar Basin. *Science in China, Series D*, 42(2); 113-119
- Hirose K. 1997. Melting experiments on herzolite LKB-1 under hydrous conditions and generation of high-magnesian andesitic melt. *Geology*, 25(1); 42-44
- Hong DW, Wang SG, Xie XL, Zhang JS. 2000. Genesis of positive(ϵ (Nd, t) granitoids in the Da Hinggan Mts.-Mongolia Orogenic belt and growth continental crust. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, 7(2); 441-456
- Jahn BM, Wu FY, Capdevila R, Martineau F, Zhao ZH and Wang YX. 2001. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: the Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China. *Lithos*, 59(4); 171-198
- Kay RW, Kay SM. 2002. Andean adakites: three ways to make them. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3); 203-311
- Kay RW. 1978. Aleutian magnesian andesites melts from subducted Pacific Ocean crust. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 4, 117-132
- Kay SM, Mpodozis C. 2001. Central Andean ore deposits linker to evolving shallow subduction systems and thickening crust. *GSA Today*, 4-9
- Kay RW & Kay SM. 1999. Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics*, 219, 177-189
- Kilian R, Stern CR. 2002. Constraints on the interaction between slab melts and the mantle wedge from adakitic glass in peridotite xenoliths. *European Journal of Mineralogy*, 14(1); 25-36
- Li WP, Lu FX, Sun SP, Li JZ. 2000. Discussion on the origin of volcanic rocks of Donglingtai Formation in Beijing Xishan Mountain and its geological setting. *Acta Petrologica Sinica*, 16(3); 345-352 (in Chinese with English abstract)
- Li WP, Lu FX, Li XH, Zhou YQ, Sun SP, Li JZ, Zhang DG. 2001. Geochemical features and origin of volcanic rocks of Tiaoishan Formation in Western Hills of Beijing. *Acta Petrologica Mineralogica*, 20(2); 123-133 (in Chinese with English abstract)
- Li WP, Lu FX, Li XH, Zhou YQ, Zhang DG. 2001. The origin of early Cretaceous volcanic rocks of Yixian Formation and its interaction of the crust and mantle in Western Liaoning Province, eastern China. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 21(4); 1-6 (in Chinese with English abstract)
- Li WP, Lu FX, Li XH. 2001. Genesis for Jurassic trachyandesite in Western Hills of Beijing of eastern China and its geological significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(3); 247-254 (in Chinese with English abstract)
- Li WP, Li XH, Lu FX. 2001. Genesis and geological significance for the middle Jurassic high Sr and Y type volcanic rocks in Fuxin area of west Liaoning, northeastern China. *Acta Petrologica Sinica*, (4); 523-532 (in Chinese with English abstract)
- Li WP, Li XH, Lu FX, Zhou YQ, Zhang DG. 2002. Geological characteristics and its setting for volcanic rocks of early Cretaceous Yixian Formation in western Liaoning province, eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2); 193-204 (in Chinese with English abstract)
- Li WP, Li XH. 2004. Petrogenesis and its implication for the middle late Jurassic intermediate - acidic volcanic rocks in the middle section of Yanshan Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3); 501-510 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Liu Y, Tu XL, Hu GQ, Zeng W. 2002. Precise determination of chemical compositions in silicate rocks using ICP-AES and ICP-MS: A comparative study of sample digestion techniques of alkali fusion and acid dissolution. *Geochemica*, 31(3); 289-294 (in Chinese with English abstract)
- Li XY, Fan WM, Guo F, Wang YJ, Li CW. 2004. Modification of the lithospheric mantle beneath the northern North China Block by the Paleo-Asian Ocean: geochemical evidence from mafic volcanic rocks of the Nadaling Formation in the Xishan area, Beijing. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3); 557-566 (in Chinese with English abstract)
- Liang XR, Wei GJ, Li XH, Liu Y. 2003. Precise measurement of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and Sm/Nd ratios using multiple-collectors inductively coupled plasma-mass spectrometer (MC-ICPMS). *Geochemica*, 32(1); 91-96 (in Chinese with English abstract)
- Liu YS, Gao S, Zhou L, Zhang L, Jin S. 2001. Geochronology and geodynamic implications of the felsic granulite xenoliths from the Hannuoba Basalt. *Geochimica*, 30(1); 50-56 (in Chinese with English abstract)
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46; 411-429
- Muir RJ, Weaver SD, Bradshaw JD, Eby GN, Evans JA. 1995. The Cretaceous separation point batholith, New Zealand: granitoid magmas formed by melting of mafic lithosphere. *Journal of Geological Society, London*, 152; 689-701
- Peacock SM, Rushmer T, Thompson AB. 1994. Partial melting of subducting oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 121; 227-244
- Petford N, Atherton M. 1996. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: the Cordillera Blanca Batholith, Peru. *Journal of Petrology*, 37; 1491-1521
- Polat A, Kerrich R. 2001. Magnesian andesites, Nb-enriched basalt-andesites, and adakites from late-Archaean 2.7 Ga Wawa greenstone belts, Superior Province, Canada: implications for late Archaean subduction zone petrogenetic processes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141(1); 36-52
- Rapp RP, Shimizu N, Norman MD, Applegate GS. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160; 335-356
- Shinjo R. 1999. Geochemistry of high Mg andesites and the tectonic evolution of the Okinawa Trough-Ryukyu arc system, *Chemical Geology*, (157)1-2; 69-88
- Stern RA, Hanson GN. 1991. Archaean high-Mg granodiorite: a derivative of light rare earth element-enriched monzodiorite of mantle origin. *Journal of Petrology*, 32, 201-238
- Sun SS, McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunderson AD, Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*, Geological Society Special Publication, 42; 313-345
- Wang DF, Diao NC. 1983. The geochemistry and isotopic characters of strontium of the volcanic belt at Yanliao district and its tectonic significance. *Bull. Shanyang Inst. Geol. Min. Res. Chese Acad. Geol. Sci.*, (6); 115-121 (in Chinese with English abstract)
- Wang PJ, Liu WZ, Wang SX, Song WH. 2002. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and K/Ar dating on the volcanic rocks in the Songliao basin, NE China: constraints on stratigraphy and basin dynamics. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, 91; 331-340
- Wei GJ, Liang XR, Li XH, Liu Y. 2002. Precise measurement of Sr isotopic composition of liquid and solid base using MC-ICPMS. *Geochemica*, 31(5); 295-299 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Sun DY, Li H, Jahn BM, Wilde S. 2002. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 187(1/2); 143-173
- Xu BL, Wang Sh G, Han BF, Yan G H, He Zh. 1998. A-type granites with the character of enrichment and loss with particular reference to both suites of the Yanshan, North China and Wulungube, Northwest China. *Acta Scientiarum Naturalium, Universitatis Pakinensis*, 34(2-3); 352-362 (in Chinese with English abstract)
- Xu JF, Mei HJ, Yu XY, Bai ZH, Niu HC, Chen FR, Zhen ZP, Wang Q. 2001. Adakites related to subduction in the northern margin of Junggar arc for the Late Paleozoic: Products of slab melting. *Chinese Science Bulletin*, 46; 1312-131

- Yan G H, Mu B L, Xu B L, He G Q, Tan L K, Zhao H, He Z F, Zhang R H, Qiao, G Sh. 1999. Triassic alkaline intrusives in the Yanliao-Yinshan area: their chronology, Sr, Nd and Pb isotopic characteristics and their implication. *Science in China, Ser. D*, 42 (6): 582 - 587
- Yin An, Mark H. 1996. A Phanerozoic palinspastic reconstruction of China and its neighboring regions. In: Yin An, Mark Harrison. The tectonic evolution of Asia. Cambridge University Press, 442 - 485
- Yogodainski G M, Kay R W, Volynets O N, Koloskov A V, Kay S M. 1995. Magnesian andesite in the western Aleutian Komandorsky region: implication for slab melting and processes in the mantle wedge. *Geology Society Am Bull.*, 107: 505 - 517
- Yogodainski G M, Lees J M, Churikova T G, Dorendorf F, Woerner G, Volynets O N. 2001. Geochemical evidence for the melting of subducting oceanic lithosphere at plate edges. *Nature*, 409: 500 - 503
- Zhang G H, Zhou X H, Chen S H, Sun M. 1998. Sr, Nd and Pb isotopic five dimension characteristics of Granulite and pyroxenite xenoliths in Hannuoba basalts and their geological implication. *Chinese Science Bulletin*, 43(20): 2218 - 2222 (in Chinese)
- Zhang Q, Wang Y, Wang YL. 2001. Preliminary study on the components of the lower crust in east China Plateau during Yanshanian Period: constrains on Sr and Nd isotopic compositions of adakite-like rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 505 - 513 (in Chinese with English abstract)
- Zhang L G *et al.* 1995. Block-geology of Eastern Asia lithosphere-isotope geochemistry and dynamics of upper mantle, basement and granite. Beijing: Science Press, 1 - 249 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Zh C, Wang Y Q. 1997. Indosinian Alkaline Magmatism in North Hebei Province and Its Geodynamic Significance. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 16 (4): 214 - 217 (in Chinese with English abstract)
- Zhou X H, Zhang G H, Yang J H, Chen W J, Sun M. 2001. Sr-Nd-Pb isotope mapping of late Mesozoic volcanic rocks across northern margin of North China craton and implications to geodynamic processes. *Geochimica*, 20(1): 10 - 23 (in Chinese with English abstract)
- Zhou X H, Sun M, Zhang G H, Chen S H. 2002. Continental crust and lithospheric mantle interaction between North China: isotopic evidence from granulite xenoliths in Hannuoba, Sino-Korean craton. *Lithos*, 62: 111 - 124
- Zhu B Q. 1995. The mapping of geochemical province in China based on Pb isotopes. *Journal of Geochemical Exploration*, 55: 171 - 181
- Zhu B Q, Chang X Y. 2001. Geochemical provinces and their boundaries. *Advance in Earth Sciences*, 16(2): 153 - 162
- 附中文参考文献**
- 陈道公, 支霞臣, 李彬贤, 王银喜, 杨杰东. 1997. 汉诺坝玄武岩中辉石岩类捕虏体的 Nd, Sr, Pb 同位素及成因信息. *地球化学*, 26(1): 1 - 11
- 陈义贤, 陈文寄等. 1997. 辽西及邻区中生代火山岩——年代学地球化学和构造背景. 北京: 地震出版社, 1 - 279
- 董树文, 吴锡浩, 吴珍汉, 邓晋福, 高锐, 王成善. 2000. 论东亚大陆的构造壳变——燕山运动的全球意义. *地质论评*, 46(1): 8 - 13
- 韩宝福, 何国琦, 王式洗. 1999. 后碰撞幔源岩浆活动、底垫作用及准噶尔盆地基底的性质. *中国科学(D辑)*, (1) 16 - 21
- 洪大卫, 王式洗, 谢锡林, 张季生. 2000. 兴安造山带正 $\epsilon(\text{Nd}, t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长. *地学前缘*, 7(2): 441 - 456
- 李伍平, 路凤香, 孙善平, 李家振. 2000. 北京西山东岭台组火山岩起源及其构造背景探讨. *岩石学报*, 14(3): 345 - 352
- 李伍平, 路凤香, 李献华, 周瑶琪, 孙善平, 李家振, 章大港. 2001. 北京西山髻髻山组火山岩的地球化学特征与岩浆起源. *岩石矿物学杂志*, 20(2): 123 - 133
- 李伍平, 路凤香, 李献华, 周瑶琪, 章大港. 2001. 辽西地区义县组火山岩的起源及壳幔相互作用. *矿物岩石*, 21(4): 1 - 6
- 李伍平, 李献华, 路凤香. 2001. 辽西中侏罗世高 Sr 低 Y 型火山岩的成因及其地质意义. *岩石学报*, 17(4): 523 - 532
- 李伍平, 路凤香, 李献华. 2001. 北京西山髻髻山组粗安岩的成因及其地质意义. *岩石矿物学杂志*, 20(3): 247 - 254
- 李伍平, 李献华, 路凤香, 周瑶琪, 章大港. 2002. 辽西早白垩世义县组火山岩地质特征及其构造背景. *岩石学报*, 18(2): 193 - 204
- 李伍平, 李献华. 2004. 燕山造山带中段中晚侏罗世中酸性火山岩的成因及其意义. *岩石学报*, 20(3): 501 - 510
- 李献华, 刘颖, 涂湘林, 胡光黔, 曾文. 2002. 岩石样品化学组成的 ICP-AES 和 ICP-MS 准确测定——酸溶与碱熔分解样品方法的对比. *地球化学*, 31(3): 289 - 294
- 李晓勇, 范蔚茗, 郭锋, 王岳军, 李超文等. 2004. 古亚洲洋对华北陆缘岩石圈的改造作用: 来自于西西南大岭组中基性火山岩的地球化学证据. *岩石学报*, 20(3): 557 - 566
- 梁细荣, 韦刚健, 李献华, 刘颖. 2003. 利用 MC-ICPMS 精确测定 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 Sm/Nd 比值. *地球化学*, 32(1): 91 - 96
- 刘勇胜, 高山, 周炼, 张利, 金淑燕. 2001. 汉诺坝长英质麻粒岩包体同位素年代学及其地球动力学意义. *地球化学*, 30(1): 51 - 56
- 王东方, 刁乃昌. 1983. 燕辽火山岩带钼、锶同位素特征及其与大地构造的关系. *中国地质科学院沈阳地矿所刊*, 6: 115 - 120
- 韦刚健, 梁细荣, 李献华, 刘颖. 2002 (LP) MC-ICPMS 方法精确测定液体和固体样品的 Sr 同位素组成. *地球化学*, 31(3): 295 - 299
- 许保良, 王式洗, 韩宝福, 阎国翰, 何中甫. 1998. 富集型与亏损型 A 型花岗岩——以燕山地区和乌伦古河地区岩石为例, 北京大学学报(自然科学版), 34(2-3): 352 - 362
- 许继锋, 梅厚钧, 于学元, 白正华, 牛贺才, 陈繁荣, 郑作平, 王强. 2001. 准噶尔北缘晚古生代岛弧中与俯冲作用有关的 adakite 火山岩: 消减板片部分熔融的产物. *科学通报*, 46: 684 - 687
- 阎国翰, 牟保磊, 许保良, 何国琦, 谭林坤, 赵晖, 何中甫, 张任祐, 乔广生. 2000. 燕辽—阴山三叠纪碱性侵入岩年代学和 Sr, Nd, Pb 同位素特征及意义. *中国科学(D辑)*, 30(4): 380 - 387
- 张招崇, 王永强. 1997. 冀北印支期碱性岩浆活动及其地球动力学意义. *矿物岩石地球化学通报*, 16(4): 214 - 217
- 张国辉, 周新华, 陈绍海, 孙敏. 1998. 汉诺坝玄武岩中麻粒岩和辉石岩捕虏体 Sr-Nd-Pb 同位素五维空间特征及地质意义. *科学通报*, 43(20): 2218 - 2222
- 张理刚等. 1995. 东亚岩石圈块体地质——上地幔、基底和花岗岩同位素地球化学及其动力学. 北京: 科学出版社, 1 - 249
- 张旗, 王焰, 王元龙. 2001. 燕山期中国东部高原下地壳组成初探: 埃达克质岩 Sr, Nd 同位素制约. *岩石学报*, 17(4): 505 - 513
- 朱炳泉. 常向阳. 2001. 地球化学省与地球化学边界. *地球科学进展*, 16(2): 153 - 162
- 周新华, 张国辉, 杨进辉, 陈文寄, 孙敏. 2001. 华北克拉通北缘晚中生代火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素填图及其构造意义. *地球化学*, 30(1): 10 - 23